

# Peren<sup>2</sup>bois : évaluation technico-économique des performances énergétiques et environnementales des meilleures techniques disponibles de réduction des émissions de poussières fines et de composés organiques pour les appareils de combustion domestique utilisant la biomasse

## PEREN<sup>2</sup>BOIS: techno-economical evaluation of the energetic and environmental performance of the best available technologies for reducing fine particle and organic compound emissions from domestic combustion devices using biomass

I. FRABOULET<sup>(1)</sup>, S. BACHELLEZ<sup>(2)</sup>, J.L. BESOMBES<sup>(3)</sup>, M. BONDOT<sup>(4)</sup>, F. CHOPIN<sup>(5)</sup>, S. COLLET<sup>(1)</sup>, E. DEFLORENNE<sup>(6)</sup>, E. HENRINKSEN<sup>(7)</sup>, G. HAREL<sup>(1)</sup>, A. KIENNEMANN<sup>(7)</sup>, J. LANDREAU<sup>(8)</sup>, T. MALLEREAU<sup>(9)</sup>, M.L. RABOT QUERCI<sup>(10)</sup>, L. ROBERT<sup>(8)</sup>, C. ROGAUME<sup>(11)</sup>, Y. ROGAUME<sup>(11)</sup>, F. TABET<sup>(5)</sup>

### Mots-clés

Combustion domestique biomasse, émissions particulaires, méthodes de mesure, techniques de réduction des émissions, lévoglucosan.

### Keywords

Domestic combustion using biomass, particulate matter emissions, measurement methods, reduction techniques, levoglucosan.

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par les partenaires cités dans la convention n° 0801C0019-Coordination du projet INERIS

**Coordination technique** : Erwan AUTRET, Florence PROHARAM, Service Bio-ressources, Direction Production et Énergies Durables, ADEME, Angers.

(1) INERIS, Parc technologique Alata, BP2 60550 Verneuil-en-Halatte, France.

(2) CTIF, 44 avenue de la Division Leclerc 92318 Sèvres Cedex, France.

(3) LCME, université de Savoie – Polytech'Savoie – Campus Scientifique de Savoie Technolac 73376 Le Bourget-du-Lac cedex.

(4) Cheminées & Foyers Axis Integral Fire – ZA de la Pellissière, 01300 Belley – France.

(5) EIFER Emmy-Noether-Strasse 11, ground floor D-76131 Karlsruhe, Allemagne.

(6) CITEPA, 7 Cité Paradis 75010 Paris.

(7) APP AS, Bedriftsvelen N-4313 Snandnes, Norvège.

(8) LMSPC, 25 rue Becquerel 67087 Strasbourg Cedex 2.

(9) POUJOLAT CERIC BP 01 79270 Saint Symphorien, France.

(10) Chazelles, Route de Marthon 16380 Chazelles.

(11) SUPRA 28, rue du Général Leclerc, BP 22, 67166 Obernai.

(12) LERMAB, 27 rue du Merle Blanc BP 1041, 88051 Épinal cedex 9.

## Introduction

Le projet PEREN<sup>2</sup>BOIS (cf. convention ADEME n°0801C0019) a été réalisé dans le cadre de l'appel à projets de R&D 2008 de l'ADEME « Performances Biomasse Energie, le chauffage domestique » avec le soutien scientifique et financier du ministère de l'Écologie. Ce projet visait à identifier et caractériser les techniques et/ou les pratiques permettant de réduire les émissions de polluants particulaires et gazeux dues à la combustion du bois dans le secteur domestique.

Coordonné par l'INERIS, ce projet a rassemblé 12 partenaires :

- Centres d'études : CITEPA, CTIF, EIFER, INERIS ;
- Industriels : Axis, APP, Chazelles, Poujoulat-CERIC, Supra ;
- Laboratoires universitaires : LCME, LERMAB, LMSPC.

Le présent document constitue une synthèse des actions entreprises et des principales conclusions de l'étude PEREN<sup>2</sup>BOIS. L'intégralité des travaux réalisés, la description détaillée des méthodes mises en œuvre et l'ensemble des résultats obtenus sont présentés dans le rapport final de l'étude [1].

## Contexte et objectifs

Le bois constitue une source d'énergie renouvelable, permettant de réduire le recours aux combustibles fossiles, et ainsi de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, dans la mesure où les forêts sont durablement gérées et en considérant que le dioxyde de carbone émis lors de sa combustion est consommé dans le processus de croissance des arbres. Cependant, la combustion du bois génère d'autres polluants atmosphériques tels que les particules fines, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), le monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatils (COV) (figure 1).

Les appareils de chauffage domestique sont plus nombreux et moins aisés à contrôler en fonctionnement que les chaufferies utilisées dans les secteurs collectifs, tertiaires et industriels. Ils sont en outre des générateurs importants de polluants puisqu'ils participent à la source combustion de biomasse qui, en 2010, contribuait à hauteur de 35 % aux émissions nationales françaises des particules fines de diamètre inférieur à 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) selon l'inventaire du CITEPA de 2012.

Le projet PEREN<sup>2</sup>BOIS a consisté en six actions à :

1. Mettre à jour les connaissances en termes d'émissions de polluants atmosphériques d'une part, et des techniques permettant de réduire les émissions atmosphériques, d'autre part.

2. Faire :

- un état des lieux des méthodes de mesure des émissions particulaires existantes qui a fait apparaître une certaine hétérogénéité, au niveau européen des protocoles suivis.
- une évaluation technico-économique d'un certain nombre de techniques primaires et secondaires de réduction des polluants atmosphériques issus des appareils de chauffage domestique fonctionnant au bois. Les techniques intervenant au niveau de la combustion sont qualifiées de « techniques primaires », celles pouvant être installées dans le conduit d'évacuation des fumées sont qualifiées de « techniques secondaires ».

La répartition et distribution de l'air primaire et secondaire dans la chambre de combustion et l'utilisation de matériaux de construction spécifiques ont été les techniques primaires étudiées.

Parmi les techniques secondaires inventoriées, quatre d'entre elles ont été étudiées : l'électrofiltre positionné dans le conduit ou en sortie de cheminée, le cyclone et le filtre catalytique, chacune couplée à un appareil et à un type de combustible spécifique. Le tableau I présente les techniques secondaires de réduction des émissions testées.

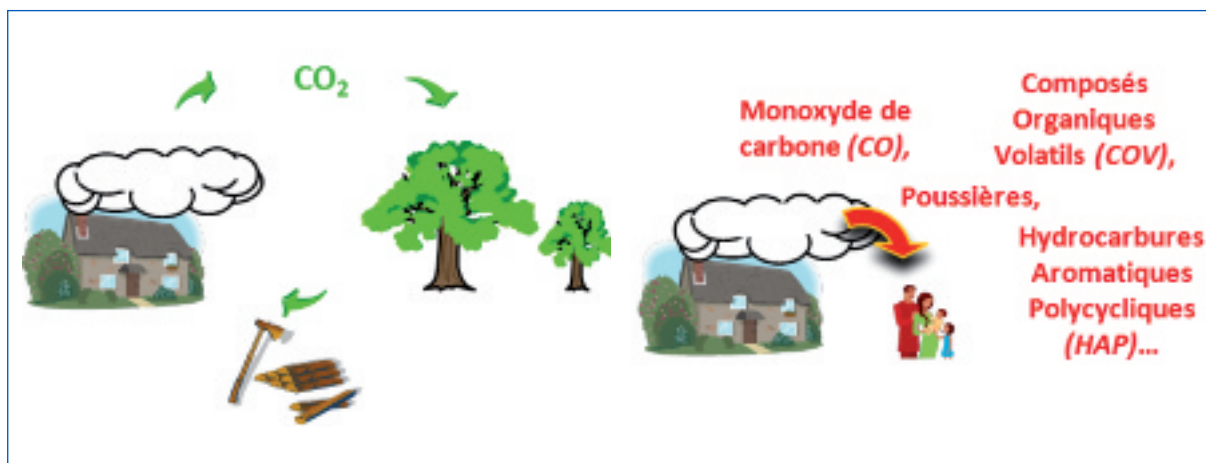


Figure 1.

Chauffage au bois : énergie renouvelable, mais source de polluants atmosphériques.

Tableau I.  
Techniques secondaires de réduction des émissions testées dans le cadre de PEREN<sup>2</sup>BOIS

Système	Technologie	Stade de développement	Appareil/combustible
Zumikron Rüegg Cheminée AG  	Filtre électrostatique	commercialisé	Insert/bûches
Der Ofenkatalysator MoreCat  	Filtre catalytique	commercialisé	Insert/bûches
R_ESP APP AS  	Filtre électrostatique en sortie de cheminée	phase finale d'essais de terrain	Poêle/bûches Poêle/granulés
ReCyclone ACS AS  	Cyclone optimisé numériquement	en développement	Chaudière/bûches

3. Déterminer les facteurs d'émissions des appareils de chauffage testés avec et sans système secondaire de réduction des émissions. Les facteurs d'émissions obtenus ont été comparés à ceux utilisés par le CITEPA pour réaliser les inventaires nationaux d'émissions.

4. Approfondir l'étude des indicateurs de la source combustion du bois tels que le lévoglucosan, pour évaluer l'efficacité des politiques de réduction des émissions. La mesure du lévoglucosan dans l'air

ambiant est une approche reconnue et décrite dans la littérature qui permet d'évaluer la part attribuable à la combustion de biomasse dans la pollution de l'air (feux de forêt, brûlage de biomasse à l'air libre et utilisation d'appareils de chauffage biomasse) [2, 3]. En effet, cette molécule, de type déhydromonosaccharide, issue de la dégradation thermique de la cellulose, non détectée lors de la combustion de combustibles fossiles, est la plus émise par la combustion de biomasse. L'objectif du projet était de

déterminer si le lévoglucosan pouvait être utilisé en tant qu'indicateur de l'efficacité des politiques de réduction des émissions.

5. Proposer des bonnes pratiques de conduite des appareils domestiques en vue d'une utilisation optimisée en termes d'énergie et d'environnement, sous la forme de fiches à l'usage des utilisateurs.

6. Identifier les contraintes et verrous associés à la mise en œuvre des techniques de réduction primaires et secondaires des émissions étudiées ainsi que des solutions pouvant être proposées pour y répondre. Des recommandations à l'attention des fabricants, visant à améliorer l'intégrabilité de ces systèmes à leur contexte d'utilisation ont été établies.

## Résultats

### Bilan des émissions et des techniques de réduction

Il ressort de ce bilan que :

- le niveau d'émissions associé à la combustion du bois dépend d'un très grand nombre de paramètres tels que la qualité du bois, l'ancienneté et la technologie du foyer, son installation, son entretien, son réglage, son mode d'alimentation et d'utilisation de l'appareil de chauffage ;
- les phases de la combustion les plus émettrices de polluants (HAP, particules fines, CO, COVNM) sont celles de l'allumage et dans une moindre mesure, la fin de la combustion ;

- les utilisateurs, les installateurs et les constructeurs peuvent chacun contribuer à la mise en œuvre des mesures de réduction primaire.

### Méthode de mesure des particules

Le bilan des connaissances a également montré [4, 5] que les aérosols émis par la combustion du bois sont caractérisés par la présence, en plus de la fraction solide, en quantité importante d'espèces organiques condensables. Ces espèces conduisent à la formation d'une quantité significative de particules fines présentes dans l'air ambiant.

Par ailleurs, le bilan des méthodes de mesure fait apparaître une certaine hétérogénéité, au niveau européen, des protocoles suivis pour la mesure des émissions de particules totales (TSP) issues des appareils de chauffage domestique à combustion de bois. À titre d'illustration, certaines méthodes prennent en compte ces espèces condensables alors que d'autres ne comptabilisent que la fraction solide, ce qui rend difficile toute comparaison des résultats obtenus par ces différentes méthodes de mesure.

Cet état des lieux a conduit à l'étude et la validation d'une méthode de mesure qui s'appuie sur la méthode allemande/autrichienne DIN+, communément mise en œuvre en France et qui consiste en un prélèvement sur filtre chauffé. La fraction condensable : elle est collectée dans une série de barboteurs contenant de l'isopropanol située après le dispositif de filtration. Le protocole proposé s'appuie sur la norme EN TS 15439 [6] relative à la détermination des émissions issues de gazéification de la biomasse.

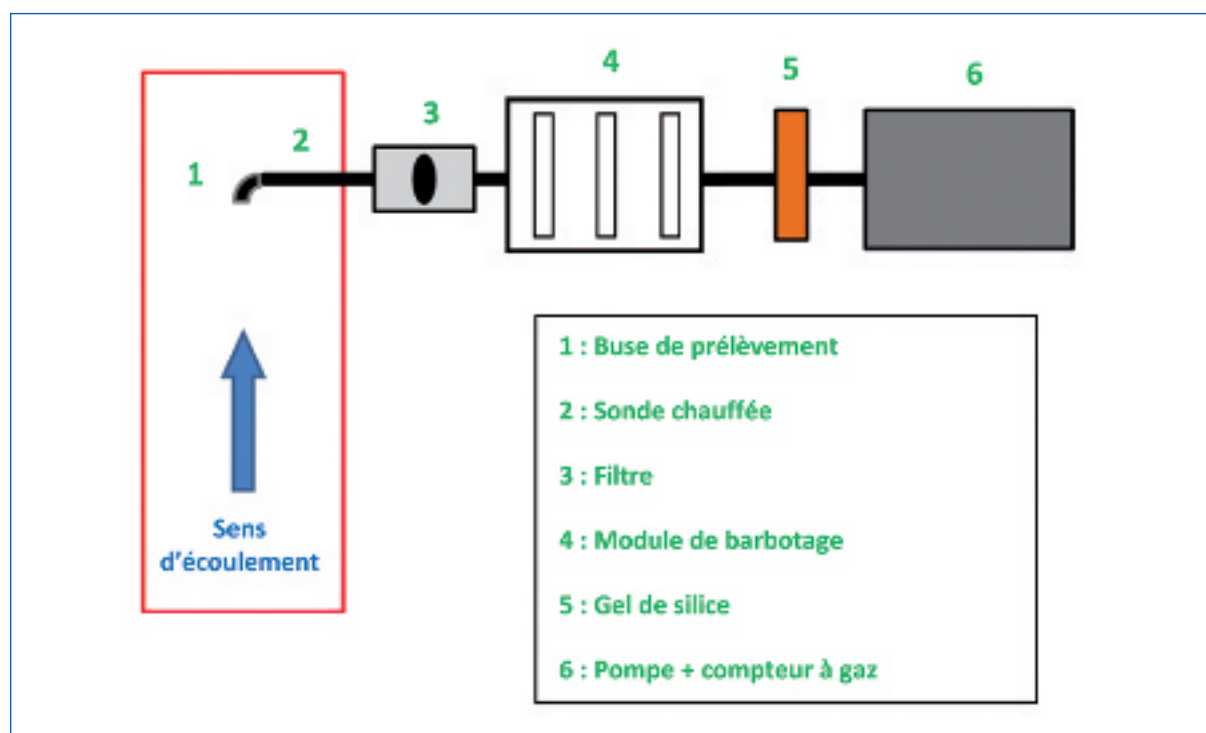


Figure 2.

Schéma de la méthode de mesure des particules développée et validée dans le cadre du projet PEREN<sup>2</sup>BOIS.

Les travaux réalisés sur le prélèvement de la fraction solide ont permis de proposer des modifications du protocole DIN+ initial notamment sur le contrôle et le maintien de la température du flux de gaz lors de la filtration à 125 °C. Des essais d'intercomparaison de la méthode réalisés dans ces conditions sur trois plates-formes d'essais ont donné des résultats acceptables : incertitude élargie de  $\pm 68$  % (pour 18 essais réalisés sur un même foyer).

La combinaison de la méthode DIN+ avec le prélèvement de la fraction condensable par barbotage à l'isopropanol inspiré de la méthode EN TS 15439 : 2006 a été comparée avec succès à la méthode de référence norvégienne utilisant un filtre à température ambiante après dilution dans un tunnel à dilution (NS 3058-2 [7]) et à l'utilisation des COV totaux en tant qu'indicateur, lors d'essais réalisés dans le cadre du CEN qui ont conduit à la rédaction du projet de norme prEN 16510 [8]. Elle a d'autre part été proposée à l'ADEME et au SER pour être testée sur un certain nombre d'appareils afin de prendre en compte les poussières dans le calcul de l'indice Flamme Verte.

#### Étude des techniques primaires et secondaires de réduction des émissions atmosphériques

Les performances des techniques primaires et secondaires de réduction des émissions de polluants atmosphériques ont été évaluées lors de campagnes d'essais visant à caractériser de manière comparative les émissions :

- avec ou sans la mise en œuvre des techniques de réduction dans le cas de l'apport d'air primaire et secondaire et des techniques catalytiques ;

- en amont et en aval du système d'épuration dans le cas des techniques secondaires de type électrofiltre et cyclone.

Deux techniques primaires ont été étudiées :

- une répartition et un débit appropriés de l'air primaire et/ou secondaire dans la chambre de combustion. L'apport d'air en excès ou bien en trop faible quantité conduit à l'augmentation des émissions polluantes.
- l'utilisation de matériaux de construction spécifiques. Dans les conditions d'essais menés (réalisation de prototypes à partir d'un appareil en fonte), le foyer en acier et briques réfractaires, suivi de près par le foyer en fonte, sont les moins émetteurs de polluants. À condition d'adapter la géométrie du foyer, le troisième matériau testé (acier et vermiculite) peut également permettre d'obtenir de bonnes performances.

Les résultats obtenus lors de l'étude de quatre techniques secondaires sont présentés dans la Figure 3.

Les résultats obtenus dans le cadre du projet sont comparés ici aux données existantes c'est-à-dire celles collectées dans le cadre de l'action 1 relative au bilan des connaissances sur les techniques de réduction des émissions issues de la combustion domestique du bois, ainsi que des données issues d'un rapport [9] publié fin 2011 par un groupe d'experts internationaux dans le cadre des travaux de l'International Energy Agency (IEA) présentant un bilan des connaissances sur l'efficacité des techniques secondaires de réduction des émissions issues de la combustion domestique du bois. En l'absence de données disponibles pour la technologie

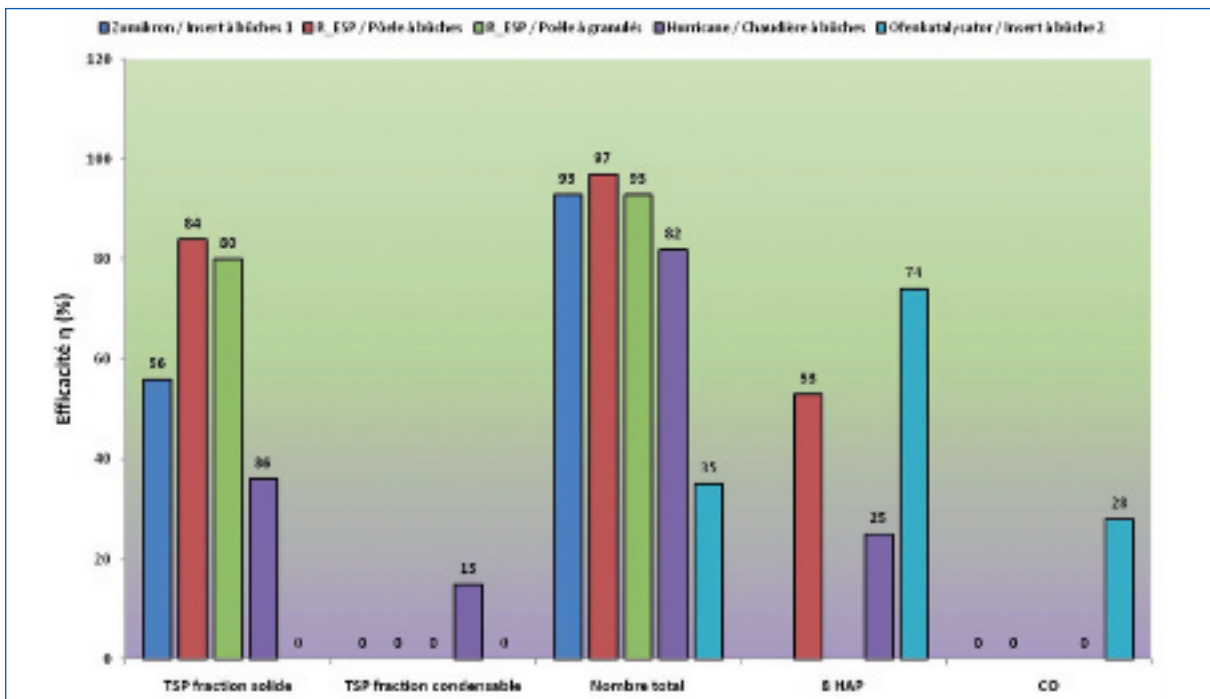


Figure 3. Performances d'épuration des techniques secondaires évaluées



Tableau II.  
Comparaison des données d'efficacité déterminées avec les données existantes

	Der Ofenkatalsator				Zurückron		R_ESP	
	CO	Mass fraction solide	COVT	HAP	Nombre	Mass fraction solide	Mass fraction solide	Nombre
Données partenaires collectées en début de projet (PEREN <sup>2</sup> BOIS Action 1)	Labo 35%	Labo 12%	Aucune efficacité		Labo (n=3) >=80% Terrain (n=9) 40-75 %	Labo 50-75% Terrain (n=3) 40-60%	Terrain 40-80% (valeurs extrêmes exclues)	
Données littérature	I/D Labo 80% Kuepio labo 87-93%	-	I/D Labo 90% Kuepio labo 95-100% (COVNM) 30-70% CHH	I/D Labo 60% Kuepio labo 20-50%	Terrain (n=12) 25-65%	Rapport IEA 41% (solid fraction n=13) (Austria) 11-17% (n=35, Germany)	Rapport IEA 80% (Suède) 55-62% (n=36, Allemagne)	Rapport IEA 85-90% (Sweden)
Résultats obtenus dans PEREN <sup>2</sup> BOIS Action 4	25%	Aucune efficacité	Non déterminée	74%	Labo (n=3) 68 %	Labo (n=6) 42-78 %	Labo (n=12) 63-95%	Labo 93-97% (n=3)

prototype de cyclone testée, cette comparaison concerne uniquement les électrofiltres et le filtre catalytique.

- les électrofiltres présentent de bonnes performances vis-à-vis de la fraction solide des particules ; en revanche, ils n'ont aucune efficacité sur la fraction condensable ;
- le cyclone spécifiquement adapté pour le projet n'a pas bénéficié de conditions d'essais favorables. Cependant, le test réalisé a mis en évidence des phénomènes de condensation intéressants à exploiter en vue de diminuer la fraction condensable des polluants émis ;
- le filtre catalytique, évalué dans des conditions discriminantes du fait des performances environnementales élevées de l'appareil auquel il était associé, a néanmoins révélé une efficacité sur certains HAP ainsi que sur le CO.

Parmi ces techniques, l'électrofiltre R\_ESP placé en sortie de cheminée présente le plus grand intérêt en raison de sa bonne efficacité d'épuration globale et de son coût relativement raisonnable. Cependant, il ne permet pas de réduire les concentrations des composés condensables émis et implique la mise en œuvre, difficilement envisageable chez les particuliers, d'un équipement sous haute tension électrique.

Enfin, des interrogations demeurent quant à l'efficacité, l'utilisation et l'entretien de ces techniques sur le long terme.

#### Comparaison des facteurs d'émissions obtenus avec ceux utilisés pour les inventaires du CITEPA

Les facteurs d'émissions obtenus à l'occasion des campagnes de mesures réalisées ont été comparés à ceux utilisés par le CITEPA pour réaliser les inventaires nationaux d'émissions. La comparaison est présentée dans le Tableau III.

Les facteurs issus des campagnes de mesures sont généralement plus faibles que ceux des inventaires nationaux. Ceci peut s'expliquer par différentes raisons :

- les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA ont vocation à représenter les émissions de polluants en conditions réelles, alors que les données collectées dans le cadre du projet ont été obtenues dans des conditions de laboratoires (fonctionnement optimal, humidité contrôlée, etc.)
- pour les émissions de particules, l'hétérogénéité des méthodes de détermination rend difficile toute comparaison des données. Ceci renforce la nécessité d'une méthode de mesure commune au niveau européen, mise en avant par le projet EN\_PME\_TEST coordonné par l'INERIS, financé par l'ADEME et qui a démarré début 2012.
- les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA pour la réalisation des inventaires ne tiennent pas compte de la nature du combustible utilisé.

#### Utilisation d'indicateurs environnementaux

Les mesures effectuées sur les différents essais ont montré la présence de composés de la famille des dehydromonosaccharides issus de la dégradation thermique de la cellulose. Le lévoglucosan est le plus émis mais avec des facteurs d'émissions compris entre 0,2 à 216 mg/kg de bois suivant les essais. D'autre part, les travaux ont permis de montrer que dans les conditions de prélèvement utilisées ce composé était présent à la fois dans la phase gazeuse et la phase particulaire. La fraction particulaire représente de 10 à 100 % de la concentration totale suivant le type d'essai.

L'utilisation des dispositifs de filtration testés dans le cadre de PEREN<sup>2</sup>Bois conduit à des abaissements des concentrations en lévoglucosan relativement faibles. Seuls les essais réalisés sur le poêle à bûches équipé du dispositif de filtration R\_ESP et l'insert à bûches équipé du catalyseur conduisent à une diminution significative des rejets en lévoglucosan, avec respectivement des abaissements de 54 % et 83 % des concentrations.

Le projet PEREN<sup>2</sup>BOIS a confirmé le rôle de traceur de cette molécule pour les pollutions particu-

Tableau III.  
Comparaison des facteurs d'émissions (n correspond au nombre d'essais réalisés)

Appareil	Insert bûches 1	Insert bûches 2	Poêle bûches	Poêle granulés	Chaudière bûches
TSP fraction solide					
FE TSP fraction solide (mesures sur filtre seul) déterminé dans action 4 (mg/MJ)	15 ± 9 (n*=6)	18 ± 6 (n=6)	116 ± 38 (n=6)	44 ± 18 (n=5)	67 ± 48 (n=3)
FE Inventaire CITEPA fraction solide (mesures sur filtre seul) (mg/MJ)	Récent 260,0	Récent 260,0	Récent 260,0	Performant 140	Récente 50
8 HAP					
FE 8 HAP déterminé dans action 4 (mg/GJ)	30 ± 60 (n=6)	100 ± 150 (n=5)	2500 ± 3000 (n=5)	55 ± 30 (n=4)	600 ± 700 (n=6)
FE Inventaire CITEPA 8 HAP (mg/GJ)	Récent 83,2	Récent 83,2	Récent 223,6	Performant 120,4	Performant 22,0
COVT					
FE COVT déterminé dans action 4 (mg C/MJ)	300 ± 420	29 ± 42	500 ± 270	200 ± 70	590 ± 260
FE Inventaire CITEPA COVt (mg équC/MJ)	Récent 530	Récent 530	Récent 530	Performant 270	Récente 400
CO					
FE CO déterminé dans action 4	2900 ± 1100	500 ± 600	2700 ± 1400	299 ± 48	3500 ± 1900
FE Inventaire CITEPA CO	Récent 3200	Récent 3200	Récent 4000	Performant 2500	Récente 1000

lares issues de la combustion de biomasse et a complété cette approche en mettant en évidence l'intérêt de mesurer ce composé en phase gazeuse.

### Fiches de bonnes pratiques et valorisation industrielle

Afin de permettre aux utilisateurs d'améliorer la conduite de leurs appareils en vue d'une utilisation optimisée en termes d'énergie et d'environnement, sept fiches de bonnes pratiques ont été rédigées. Elles traitent des thèmes suivants :

- La combustion du bois,
- Les polluants atmosphériques émis par la combustion du bois,
- Les techniques de réduction des polluants,
- Le combustible,
- L'appareil et son installation,
- L'allumage manuel,

- Le fonctionnement d'un appareil et les régimes de combustion.

Enfin, sur la base des contraintes et des verrous identifiés dans le cadre du projet et afférents à la mise en œuvre des systèmes de traitement, des recommandations à l'attention de leurs fabricants visant à améliorer l'intégrabilité de ces systèmes à leur contexte d'utilisation ont été établies.

Certaines concernent l'ensemble des techniques secondaires (elles doivent être facilement démontables pour un entretien régulier et permettre le respect de l'obligation réglementaire de deux ramonages annuels). D'autres, associées à des contraintes économiques, de mise en œuvre, d'intégration au bâti et/ou d'efficacité d'épuration, sont plus spécifiques. Ainsi, par exemple, pour certains filtres, il serait important de faire évoluer la législation de manière à rendre possible une mise en pression d'une partie du conduit ou d'utilisation de haute tension.

### Références

- [1] Peren2Bois\_convention0801C0019\_DRC\_11\_96869\_11144A peren2Bois, rapport final définitif, avril 2012.
- [2] Favez O, El Haddad I, Christine P *et al.* Inter-comparison of source apportionment models for the estimation of wood burning aerosols during wintertime in an Alpine city (Grenoble, France). *Atmospheric Chemistry and Physics* 2010 ; 10 : 5295-314.
- [3] Piot, C. (2011) Polluants atmosphériques organiques particulaire en Rhône-Alpes: caractérisation chimique et sources d'émissions. Université de Grenoble-Chambéry.

- [4] Nussbaumer T, Czasch C, Klippel N *et al.* Particulate Emissions from Biomass Combustion in IEA Countries, Survey on Measurements and Emission Factors, January 2008.
- [5] Nussbaumer T. Overview on Technologies for Biomass Combustion and Emission Levels of Particulate Matter, Zürich, June 2010.
- [6] EN TS 15439 : 2006 Gazéification de biomasse-Goudron et particules dans le gaz combustible-échantillonnage et analyse.
- [7] Norwegian standard NS 3058-2 June 1994, Enclosed wood heaters Smoke emission, Part 2: Determination of particulate emission.
- [8] PREN 16510-1 Residential solid fuel burning appliances – Part 1 General requirements and test methods.
- [9] Survey on the present state of particle precipitation devices for residential biomass combustion with a nominal capacity up to 50 kW in IEA member states Bioenergy Task 32 member countries, final version, December 2011, Ingwald Obernberger, Graz Austria.

